

Passive Knee Exoskeleton Systems for Cycling Assistance

著者	チャイチャオワラット ロンナピー
number	63
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第5563号
URL	http://hdl.handle.net/10097/00127691

氏 名	チャイチャオワラット	ロンナピー
	Chaichaowarat	Ronnapee
授 与 学 位	博士 (工学)	
学 位 授 与 年 月 日	平成30年9月25日	
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項	
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) バイオロボティクス専攻	
学 位 論 文 題 目	Passive Knee Exoskeleton Systems for Cycling Assistance (サイクリング支援用受動的外骨格型支援システム)	
指 導 教 員	東北大学教授 小菅 一弘	
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 小菅 一弘	東北大学教授 平田 泰久
	東北大学教授 林部 充宏	東北大学教授 田中 真美
	東北大学准教授 荒井 翔悟	

論 文 内 容 要 旨

People of all ages enjoy cycling for sport and recreation. This low-impact exercise activity is also used in various knee rehabilitation protocols for improving knee joint mobility and stability after knee injury or surgery. For short to moderate distances, this eco-friendly method of land transport is most cost-effective and time-efficient. Easing the cycling by reducing the required pedaling effort, electric bicycle is a valid solution providing high assistive power. However, the traveling range is limited and the significant increase of mass due to the added motor and battery affects the road feeling and handling characteristic. Aiming to enhance the cycling performance by reducing the leg muscle fatigue during hard cycling without providing additional energy source, passive wearable cycling support is an alternative solution which allows users to ride their favorite bicycles.

Understanding the biomechanics of motion is imperative for developing passive motion support systems to manipulate the effort required from different groups of muscle intelligently. Studies of cycling biomechanics presented that bicycling is a knee-extension dominant exercise. Taking advantage of the unbalanced effort required from the knee extensor over the knee flexor muscles, this research introduces a novel technique using a torsion spring to store energy during the knee-flexion stroke before the leg passing the crank top-dead-center (TDC) in order to release it to support the knee-extension moment after the leg passing the crank TDC. The torsional stiffness and the starting angle of the spring support are the key parameters to impose the timing and the amount of energy being manipulated, which results in the increase of the knee-flexion energy cost to trade off with the reduction of the knee-extension energy cost and the knee total energy cost. Theoretically, the peak power and peak moment of the knee joint are

significantly reduced with the spring support.

For experimental validation, two models of cycling-augmented knee exoskeleton (CAKE) were built. To ease the design and fabrication requirements, the wearable parts and fastening straps of these two exoskeleton prototypes were obtained from commercial knee braces. The dual-hinge mechanism used as the knee joint of the original knee braces was replaced by the developed spring-embedded crossing four-bar mechanism to provide a polycentric knee center of rotation (CoR) for kinematic compatibility with the anatomical knee joint covering large angle of knee flexion. Installing a torsion spring concurrently with the flexion-angle-dependent knee CoR is a key design challenge. A three-point-roller support designed on the outer rim of a torsion spring coil is presented with CAKE-1 prototype. The design not only provides a fit assembly to the non-deflected spring, but also adapts over the deflection range. An alternative design method of planar spiral spring is also proposed with CAKE-2 prototype in which the torsional stiffness is greatly improved with more compact and light-weight design.

Assuming that the quadriceps activity increases with the cycling power, the reduction of quadriceps knee-extensor muscle activity while cycling with the developed prototypes of CAKE-1 or CAKE-2 was validated through the rectus femoris (RF) muscle's surface electromyography (EMG) recorded during constant-power cycling experiments on a trainer. The appropriate training modes were selected such that the 200 W and 225 W cycling powers were obtained at the controlled leg cadence of 57 rpm. To enable participants to perform cycling at constant velocity and against constant torques, a wheel-accelerating system was developed to initially spin the rear wheel to target velocity and automatically disengage from the tire after reaching the desired velocity. The raw EMG data was analyzed in time-frequency by using a continuous wavelet transform (CWT) and the time-dependent median power spectral frequency (TD-MDF) was computed. Considering the average of TD-MDF over the cycling trials with different cycling powers, the positive relationship between the average TD-MDF and the cycling power is observed. At the same cycling power, the average TD-MDF while cycling with the CAKE-1 or CAKE-2 worn on both legs is lower than that of the cycling trial without wearing the exoskeletons.

Despite numerous studies, the relationship between the muscle contraction level and the EMG median and mean power spectral frequencies (MDF and MNF) is still ambiguous. To verify the positive relationship between the quadriceps activity during cyclic motion and the time-dependent MDF and MNF, the extended experiment of constant-power cycling was conducted at 160 W. The raw EMG data obtained from three cycling powers was analyzed in time-frequency. The TD-MDF and TD-MNF were computed by using different

window sizes. With 100-ms window, the positive relationship between the cycling power and the average TD-MDF and average TD-MNF are observed. According to the linear regression slopes of TD-MDF and of TD-MNF over time, the effect of muscle fatigue is observed as negative slope at 225 W cycling. As a new index to compare the level of muscle activity independently to the window size, the time-dependent total power-frequency product (TD-TPFP) was proven effective with the positive relationship to the cycling power. The proposed TD-TPFP was also used to validate the assistive performance of CAKE-2 under the effect of cumulative muscle fatigue during prolonged cyclic motion.

By using a torsion spring as a passive joint actuator without the need of angular position sensor, the exoskeletons consuming no electrical energy and not delivering net positive mechanical work can reduce the quadriceps activity in cycling. The ability to modify the unbalanced effort required from the quadriceps and hamstring can be applied for further development of wearable devices for cycling enhancement and rehabilitation. The study of hamstring activity is limited in this research due to the fastening strap locations. The influence of passive cycling support must be studied on various groups of leg muscle for a better understanding of human physiology.

論文審査結果の要旨

自転車は、歩行に比べて容易に長距離移動が可能な移動手段であるとともに、リクリエーションやスポーツのみならず、健康維持やリハビリテーションにも活用されている。しかし、高齢化などにより筋力が低下すると、身体への負担が大きくなり、自転車を利用しにくくなる。近年、電動のパワーアシスト自転車も販売されているが、バッテリーやモーターなどによって、重量が増えるとともにその質量特性も変わるため、利用者によっては必ずしも取り扱いが容易になるとは限らない。本研究は、自転車を利用する際に必要なサイクリングパワーを低減することによってサイクリング負担の低減を行う、受動的の外骨格型支援システムを提案するもので、全編6章からなる。

第1章は序論であり、本研究の背景、目的および構成について述べている。

第2章では、サイクリングバオメカニクスに基づき、サイクリング時の膝関節トルクに着目し、トーションスプリングとその作動範囲を制御できる機構を用いることで、サイクリング時に必要な伸筋と屈筋による膝関節トルクのバランスを調整しサイクリングパワーを低減できる、サイクリング支援用受動的の外骨格型支援システムのコンセプトを提案している。これは有益な成果である。

第3章では、提案したコンセプトに基づき、トーションスプリングと交差型4節リンク機構を用いたプロトタイプシステム CAKE-1 (Cycling-augmented Knee Exoskeleton 1) を試作し、被験者実験を行いその有効性を確認している。具体的には、サイクリングシミュレータを用いて同一パワー、同一ケイデンスでのサイクリング実験を行い、試作した CAKE-1 を装着することによって、外部からのエネルギーを投入することなく、被験者のサイクリングパワーが減少することを確認している。これは重要な成果である。

第4章では、アルキメデススパイラルを用いた平面スパイラルスプリングを新たに設計し、交差型4節リンク機構と平面スパイラルスプリングから構成される小型軽量のサイクリング支援用受動的の外骨格型支援システムプロトタイプ CAKE-2 (Cycling-augmented Knee Exoskeleton 2) を試作している。また、CAKE-1 の場合と同様の被験者実験を行い、CAKE-2 を装着することによって、必要とされるサイクリングパワーが減少することを確認している。これは有用な成果である。

第5章では、新たに平均 TD-TPFP (Average Time Dependent Total Power Frequency Product) を提案し、CAKE-2 を用いて被験者実験を行い、累積疲労が無視できないサイクリング実験においても、サイクリングパワーの指標として利用できることを明らかにしている。これは重要な成果である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、サイクリングバオメカニクスに基づき、サイクリング支援を目的とした受動的の外骨格支援システムのコンセプトを提案するとともに、プロトタイプ CAKE-1 と CAKE-2 を試作し、被験者実験を行い、その有効性を示したもので、ロボティクスおよび機械工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。